

Caracterización de la respuesta mecánica de los suelos ante eventos sísmicos y del comportamiento de distintos tipos de estructuras mediante sistemas electrónicos microcontrolados: una experiencia promocional y educativa basada en un modelo experimental

Escuela Politécnica Superior de Zamora

Beatriz García y José Nespereira

Índice

[INTRODUCCIÓN](#)

[II. MODELOS INTRODUCTORIOS](#)

[II.1 La génesis de un terremoto](#)

[II.2 La frecuencia natural de los edificios y su relación con los efectos de los terremotos](#)

[II.3 Fallo de un edificio durante un evento sísmico](#)

[II.4 Licuefacción de un suelo arenoso saturado](#)

[III. MODELO FÍSICO PARA RECREAR EVENTOS SÍSMICOS](#)

[IV. CONCLUSIONES](#)

[V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS](#)

I. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca dentro de la modalidad “Proyectos dirigidos a un centro concreto”, y en la línea de actuación “Implantación de metodologías docentes y de evaluación>Aprendizaje y evaluación de competencias>Implantación de metodologías activas de aprendizaje”.

En su planteamiento se establecía como objetivo principal *“diseñar y construir un modelo físico que permita simular un terremoto sobre un terreno licuefactable y visualizar los efectos de éste sobre las estructuras, cuantificando además la magnitud del sismo artificial por medio de un sistema de sensores regidos mediante microcontrolador.”* Para poder alcanzarlo existía un hito singular, la adquisición de una mesa vibradora, mesa que finalmente ha sido diseñada y construida expresamente para este proyecto.

El terremoto como elemento guía del proyecto

Un terremoto es un evento producido por la liberación brusca y repentina de energía acumulada en un área determinada de la tierra. Pero, ¿por qué ocurre esto?

Desde que Wegener propusiera la teoría de la Deriva de los Continentes - o quizás sea más correcto decir que desde la comunidad científica aceptó como cierta la teoría del metereólogo alemán - es sabido que en su parte más superficial la tierra está formada por una serie de bloques denominados placas litosféricas, que se mueven a distintas velocidades sobre la astenosfera. Durante estos movimientos las placas chocan entre sí, y según el lugar y la velocidad del movimiento, se va acumulando y liberando energía de forma más o menos periódica.

Se puede afirmar que a cualquier persona le interesa saber si en la zona en la que vive o en la que va a vivir, en la que trabaja o va a trabajar se pueden producir terremotos, ya que en ello va en parte su seguridad. Pero además como científicos y como ingenieros, nos debe interesar también conocer y medir la cantidad de energía que se libera (o se puede llegar a liberar) en un evento sísmico, ya que de este modo podremos prever sus consecuencias y adaptar nuestras técnicas constructivas para que las estructuras sufran el menor daño posible cuando ocurran.

El propósito que impulsa este proyecto tiene su foco en la motivación y captación de nuevos alumnos hacia las enseñanzas técnicas del Campus Viriato, sin menoscabo de que además pueda constituir una herramienta didáctica en los grados de Ingeniería Civil, Arquitectura Técnica e Ingeniería Mecánica. La temática elegida, los terremotos, involucran a Áreas de Conocimiento diversas (en particular, el Área de Geodinámica Interna del Departamento de Geología, y el Área de Electrónica del Departamento de Física Aplicada) que convergen en una materia mucho más específica, la ingeniería sísmica, a cuyas puertas desemboca este trabajo. Está previsto que este proyecto tenga proyección en los Institutos en los que la Escuela Politécnica Superior de Zamora realiza labores de difusión durante el curso, a través de charlas de divulgación. También se espera emplearlo para poder

desarrollar actividades de introducción a la investigación dentro del programa Bachillerato de Excelencia, con el que la misma Escuela colabora.

Este proyecto pone en valor la importancia de la interrelación entre materias distintas para dar soluciones a los problemas ingenieriles que se plantean. En concreto, Física y Geología van de la mano introduciendo una serie de conceptos generales a los alumnos, que finalmente ven cómo a partir de ellos van entrando en juego áreas como la sismología, la mecánica, la mecánica de suelos, la electrónica...que tratadas en conjunto permiten comprender, solucionar o mitigar un problema que puede afectar a toda la sociedad: los eventos sísmicos.

La memoria que se presenta se estructura con la pretensión de que sirva para explicar el desarrollo del proyecto. Pero también pretende servir de propuesta o guión para futuras actividades divulgadoras entre alumnos de diferentes niveles. Por ello, en una primera parte se describen varios modelos sencillos, contruidos expresamente para este proyecto y que introducen conceptos geológicos y mecánicos fundamentales. La segunda parte describe el modelo más avanzado y completo, en el que se aúnan los conocimientos tratados individualmente con anterioridad pero prestando ya más atención a la cuantificación o medición de terremotos - con la ayuda de acelerómetros integrados en sistemas microcontrolados - y al comportamiento de los diferentes tipos de estructuras.

II. MODELOS INTRODUCTORIOS

Los terremotos son eventos naturales resultado de la liberación de fuerzas elásticas acumuladas en el interior de la Tierra debido a la dinámica de las placas litosféricas¹. La mayor parte de los terremotos tienen lugar en los límites de placa (Figura 1), pero se producen también en otras localizaciones.

Los modelos que a continuación se presentan acercan a cualquier alumno conceptos básicos de áreas como la sismología, la geología, la ingeniería sísmica, la mecánica de suelos y la geotecnia: desde cómo se genera un terremoto y por qué libera energía, hasta el papel



que el terreno juega en los posibles efectos derivados de la vibración sísmica. Sirven también para introducir la importancia de la estructura en la mitigación de los daños.

Figura 1. Principales placas litosféricas (tomada de commons.wikimedia.org)

El primer modelo, **Génesis de un terremoto**, explica la liberación de energía de un terremoto a partir de la acumulación de energía elástica. El modelo **La frecuencia natural de los edificios y su relación con los efectos de los terremotos** demuestra que la altura de un edificio condiciona su modo de vibración, representado a través de su periodo, y sirve también para introducir el fenómeno de la resonancia. **Fallo de un edificio durante un evento sísmico** introduce de manera muy superficial pero efectiva la importancia que el diseño de una estructura tiene de cara a valorar los posibles daños que provoca un terremoto. Y finalmente, **La licuefacción** explica el fenómeno del mismo nombre que hace que un terreno pueda perder toda su resistencia cuando vibra ante la acción de un evento sísmico.

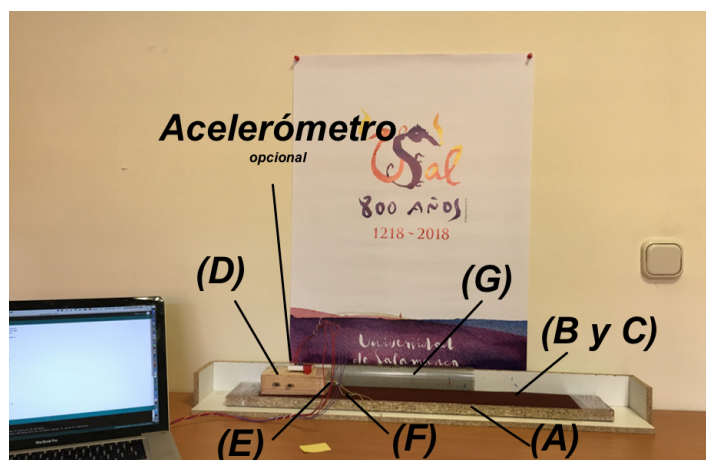
En los cuatro modelos se sigue un mismo esquema: descripción del modelo, material a emplear, proceso de montaje, actividad a desarrollar -y resolución de la misa si procede-, y una pequeña sinopsis teórica sobre lo visualizado. Todos ellos se han construido o montado expresamente para este proyecto a partir de diseños extraídos de IRIS (*Incorporated Research Institutions for seismology*), a excepción del dedicado a la licuefacción, para el que se ha perfeccionado un modelo previo diseñado por uno de los autores de este proyecto.

¹ Fragmento de litosfera - capa externa rígida de la Tierra que alcanza una profundidad de unos 100 km aunque puede variar (<http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=lithosphere>) - que se mueve como un bloque rígido sin que ocurra deformación en su base, la astenosfera, sobre la que se desliza (https://es.wikipedia.org/wiki/Placa_tectónica).

II.1 La génesis de un terremoto

Para llegar a mitigar los efectos de un terremoto es necesario conocer previamente las magnitudes de las fuerzas o energías que en ellos se liberan. Y consecuentemente, para esto último resulta indispensable conocer las causas geológicas y mecánicas que están detrás de estos destructivos fenómenos naturales.

Esta primera actividad sitúa al alumno en un marco en el que la geología y la física van de la mano. Para ello, se ha construido un sistema mecánico en el que “algo” acumula energía elástica y de manera brusca la libera -una goma elástica- provocando el desplazamiento de un bloque de madera que simula una porción de placa litosférica (Figura 2). En la realidad, el papel de la goma es simular las propiedades mecánicas de los materiales en la zona de falla;



la falla propiamente dicha sobre la que se produce el desplazamiento relativo entre dos bloques queda representada por el papel de lija, y son precisamente las características de éste las que condicionarán el modo en el que se libere la energía: de una manera más o menos brusca².

Figura 2. Modelo para la explicación de la génesis de un terremoto como proceso de acumulación de energía elástica y posterior liberación. La correspondencia de las letras insertadas en la imagen se

recoge en el apartado de Material.

Material

- (A) Tabla de madera de 720 x 95 x 20 mm
- (B) Rollo de lija de granulado de 115 x 5 mm y granulado 120.
- (C) Rollo de lija de granulado de 115 x 5 mm y granulado 40.
- (D) Taco rectangular de madera de 125 x 70 x 37 mm
- (E) Hembrilla cerrada 4 x 30 mm
- (F) Dos gomas elásticas.
- (G) Papel milimetrado
- (H) Pie de laboratorio con dos pinzas
- (I) Regla de 30 cm de longitud.

² A la acumulación de energía elástica y su posterior liberación a través del desplazamiento se le denomina rebote elástico.

Montaje

1. Sobre uno de las dos superficies de mayor extensión de (A) se adhieren sendas tiras de papel de lija: por un lado el granulado 120 y por otro el granulado 40.
2. En uno de los laterales cortos de (D) se enrosca (E).
3. A (E) se une uno de las dos gomas elásticas (F), mientras que la otra se enlaza a continuación.
4. Coloca en vertical un papel milimetrado (G).

Actividad

El objetivo principal de la actividad es comprender el origen de toda la energía que se libera durante un terremoto. Para alcanzarlo se plantean los siguientes hitos u objetivos intermedios:

- calcular la constante elástica de la goma.
- medir la energía elástica que debe acumularse para que se pueda producir el movimiento en cada lija.
- medir la fuerza necesaria para alcanzar el máximo de energía almacenada en cada caso.
- medir los desplazamientos del bloque en cada caso y comentar los resultados.

Enunciado



Monta el modelo tal y como aparece en la [Figura 3](#) y efectúa el calibrado de las gomas elásticas ([Figura 4](#)) con la ayuda de un pie de laboratorio, dos pinzas y una regla.

Apoya el bloque sobre la superficie de un granulado más grosero. Proyecta sobre el papel milimetrado auxiliar la posición inicial de un punto del bloque, y con la ayuda de un bolígrafo o lápiz estira la goma pero sin deformarla y anota la posición más alejada del bloque. Comienza a estirar la goma, anotando cada pequeños intervalos (no mayores a 5-10 mm), la posición del lápiz con el que se tira del bloque. Cuando se detecte movimiento en el bloque, localiza la nueva posición de su punto de referencia.

[Figura 3. Calibrado de las gomas elásticas.](#)

Repite el proceso pero esta vez apoyando el bloque sobre la superficie con un granulado más fino. ¿Cómo se libera la energía? ¿Podrías comentar algo relativo a la predicción de un terremoto?

Resolución

Para complementar la actividad propuesta, aquí se presentan los datos recogidos durante su preparación (Figura 4, Tabla 1 y Tabla 2). Para cada modelo construido y para cada goma empleada, los datos serán únicos, de modo que los aquí recogidos se deben considerar como referencia pero nunca como valores “solución” a los que hay que llegar.

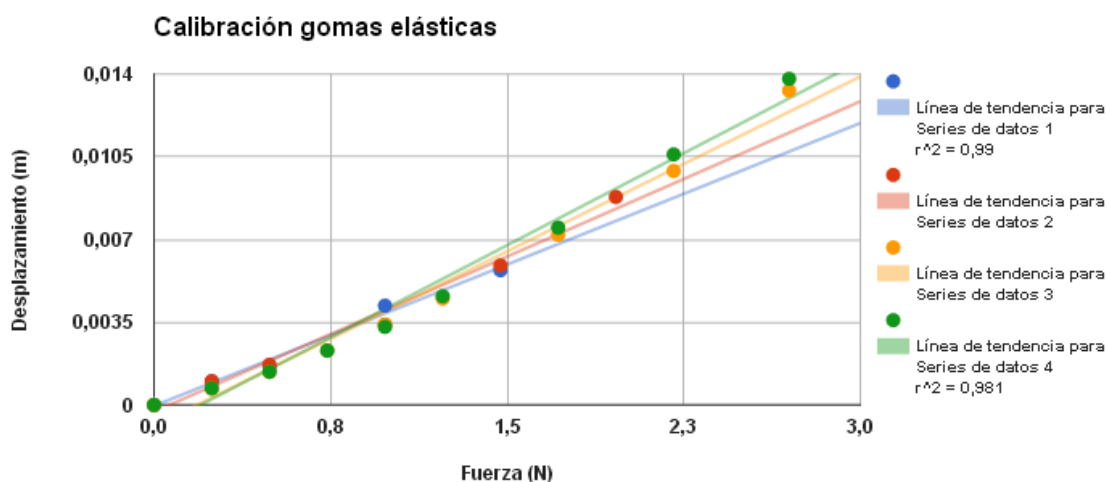


Figura 4. Curvas masa frente a desplazamiento obtenidas durante la calibración de las gomas. Constante resultante: 184 N/m.

PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4	
LECTURA (mm)	MASA (g)	LECTURA (mm)	MASA (g)	LECTURA (mm)	MASA (g)	LECTURA (mm)	MASA (g)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	25	1	25	0,7	25	0,7	25
1,6	50	1,7	50	1,4	50	1,4	50
4,2	100	3,4	100	2,3	75	2,3	75
5,7	150	5,9	150	3,4	100	3,3	100
-	-	8,8	200	4,5	125	4,6	125
-	-	-	-	7,2	175	7,5	175

-	-	-	-	9,9	225	10,6	225
-	-	-	-	13,3	275	13,8	275
k	248	k	221	k	194	k	184

Tabla 1. Datos con cuatro pruebas de calibración de las gomas elásticas.

BASE	GOMA		
POSICIÓN (mm)	POSICIÓN EXTREMO DE LA GOMA (mm)	ESTIRAMIENTO (mm)	FUERZA $F=k \cdot x$ (N)
0	162	0	0,0
0	164	2	0,4
0	180	18	3,3
0	200	38	7,0
0	220	58	10,7
10	220	0	0,0
10	175	0	0,0
10	187	12	2,2
10	205	30	5,5
10	221	46	8,5
10	225	50	9,2
10	229	54	9,9
15	229	0	0,0
15	192	0	0,0
15	207	15	2,8
15	214	22	4,0
15	224	32	5,9
15	234	42	7,7
15	245	53	9,8
25	256	0	0

Tabla 2. Toma de datos durante el ejercicio práctico a desarrollar y cálculo de la fuerza elástica ejercida por la goma

Sinopsis teórica de los conceptos a tratar

El símil mecánico: la goma elástica

Cuando estiramos³ una goma estamos poniendo en marcha la Ley de Hooke⁴. Gracias a ella sabemos que la fuerza que tenemos que hacer para estirar la goma es proporcional al estiramiento que queramos provocar, y lo expresamos matemáticamente a partir de una sencilla ecuación surgida de la experimentación:

$$F_x = k \cdot \Delta x = k \cdot (x - x_0)$$

F_x : fuerza en la dirección x.

Δx : variación de la longitud de la goma en la dirección de x.

x: posición final del extremo de la goma que se ha desplazado debido al estiramiento.

x_0 : posición inicial del extremo de la goma, antes de estirarse.

k: constante de la fuerza de la goma.

El símil mecánico: el papel de lija

En una zona de falla se produce el desplazamiento de un bloque respecto a otro a consecuencia de la liberación de la energía acumulada en los materiales circundantes. Si en esa zona, habitualmente representada por un plano, las características favorecen el movimiento (por ejemplo, por su naturaleza pulida o por la presencia de materiales más bien plásticos), con poca energía acumulada se podrá provocar ya un movimiento que la libere; en estas circunstancias el movimiento sería tenue. Si por el contrario en el plano de falla las características hacen que sea necesario la acumulación de mucha energía para poder provocar el movimiento, cuando éste ocurra el movimiento este desplazamiento puede producirse de una manera suave, si la superficie de deslizamiento es pulida o lisa, o brusca cuando estamos ante una superficie rugosa. Para este modelo se ha optado por contrastar un papel de lija de granulado 120 y otro de granulado 40; con el primero el movimiento del bloque de madera se produce con menor estiramiento de la goma.

La física detrás del movimiento vibratorio

Vibraciones sin amortiguamiento: Vibraciones libres de partículas. Movimiento armónico simple (m.a.s.)

Tomando como referencia Beer et al., (2007), si empleásemos un muelle suspendido, con una masa M en su extremo libre, el sistema alcanzaría un punto de equilibrio en $x=x_0=0$. Si llamamos δ_{st} al estiramiento sufrido por el muelle cuando se le suspende la masa M, las fuerzas actuantes serían:

³ Siempre que no superemos un determinado umbral, cuando la soltamos, la goma vuelve rápidamente a acomodarse a su longitudinal original; si lo hiciésemos, comenzarían a producirse deformaciones no recuperables.

⁴ Las fuerzas de contacto de contacto o fricción y las ejercidas por muelles y cuerdas son debidas a las fuerzas moleculares que surgen de la fuerza electromagnética básica (Tipler, 1993).

$$T = k\delta_{st}$$

$$W = Mg$$

$$T = W \Rightarrow k\delta_{st} = Mg$$

Si ahora estiramos un poco más el muelle, apartamos al sistema de la posición de equilibrio, de tal modo que las fuerzas en el instante en el que soltamos el sistema serán:

$$T = k(\delta_{st} + x_1)$$

$$W = Mg$$

$$RESULTANTE = W - T = Mg - k(\delta_{st} + x_1) = k\delta_{st} - k\delta_{st} - kx_1 = -kx_1$$

Aplicamos la 2ª Ley de Newton: $F = Ma = M \frac{dv}{dx} = M \frac{d^2x}{dt^2}$

$$F = Ma = M \frac{dv}{dx} = M \frac{d^2x}{dt^2} = -kx,$$

de tal modo que queda definido el movimiento armónico simple de un objeto, movimiento en el que la aceleración del objeto es proporcional a su desplazamiento pero en sentido opuesto.

$$Ma = -kx \Rightarrow Ma + kx = 0$$

Son dos soluciones particulares de esta ecuación las funciones:

$$x_1 = \text{sen}\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$$

$$x_2 = \text{cos}\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$$

Y la solución general -multiplicando cada una de las anteriores por una constante arbitraria y sumando-, queda del siguiente modo:

$$x = C_1 + x_1 + C_2 + x_2 = C_1 + \text{sen}\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) + C_2 + \text{cos}\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$$

Como se puede observar al dar valores a t, se trata de una función periódica del tiempo t, y define la vibración de una partícula. Al coeficiente de t, se le llama frecuencia circular natural de la vibración, y se denota habitualmente como ω_n .

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Por lo que la solución general se puede escribir también:

$$x = C_1 + x_1 + C_2 + x_2 = C_1 + \text{sen}(\omega_n t) + C_2 + \text{cos}(\omega_n t)$$

También se puede llegar desde $Ma + kx = 0$, dividiendo ambos términos entre M y sabiendo que $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$:

$$a + \frac{k}{m}x = a + \omega_n^2 x = 0$$

Por otro lado, al diferenciar con respecto a t ambos términos de la ecuación $x = C_1 \sin(\omega_n t) + C_2 \cos(\omega_n t)$ se obtiene una expresión para la velocidad y otra para la aceleración de un m.a.s.:

$$v = \frac{dx}{dt} = C_1 \omega_n \cos(\omega_n t) - C_2 \omega_n \sin(\omega_n t)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -C_1 \omega_n^2 \sin(\omega_n t) - C_2 \omega_n^2 \cos(\omega_n t)$$

Los valores de C_1 y de C_2 , las constantes, dependen de las condiciones iniciales del movimiento. Por ejemplo, $C_1=0$ si inicialmente el sistema se desplaza de su posición de equilibrio y se suelta sin

velocidad inicial en $t=0$; si $C_2=0$ la partícula parte de la posición de equilibrio con una cierta velocidad inicial.

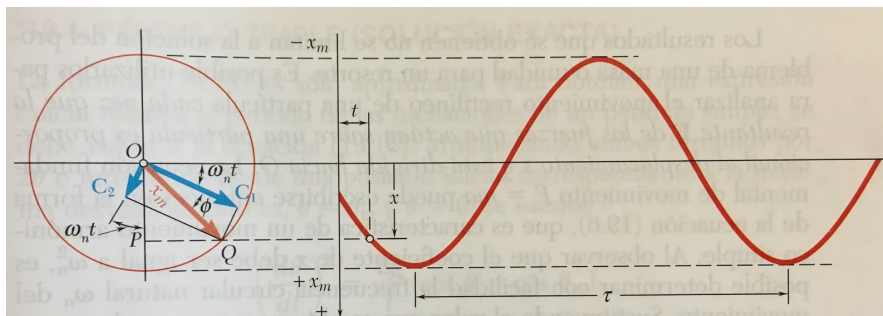


Figura 5.
Descomposición
vectorial del
desplazamiento en un
movimiento armónico
simple (tomada de Beer
& Jhonson, 2007).

Si observamos la Figura 5, vemos que el desplazamiento $x=OP$ se puede representar como la suma de dos vectores C_1 y C_2 , de la misma magnitud y dirigidos de manera determinada. Cuando pasa el tiempo, ambos vectores giran; en todo caso, en cualquier momento la magnitud de su resultante es igual al desplazamiento máximo en x , de valor x_m . Y así, el m.a.s. de P a lo largo del eje X puede obtenerse proyectando sobre este eje el punto Q que describe un círculo auxiliar de radio x_m con una velocidad angular constante ω_n . Si se le llama ϕ al ángulo formado entre OQ y C_1 :

$OP = OQ \sin(\omega_n t + \Phi)$ y por lo tanto, la expresión del desplazamiento en cada momento se puede expresar también así:

$$x = x_m \sin(\omega_n t + \Phi)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega_n x_m \cos(\omega_n t + \Phi)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_n^2 x_m \sin(\omega_n t + \Phi)$$

x_m : es la amplitud.

ω_n : es la velocidad angular

ϕ : ángulo de fase, define la posición inicial de Q en el círculo.

T (s): el periodo, es el tiempo que tarda una partícula en volver a pasar por el mismo punto durante una vibración; es la duración del ciclo.

f (Hertz o hercio, s^{-1}): la frecuencia es el número de ciclos por unidad de tiempo.

Como $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, y $\omega_n = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, se deduce que periodo y frecuencia son independientes de la amplitud como de la posición de la situación inicial, y sólo depende de la rigidez y de la masa -que no del peso- de la partícula o sistema que vibra.

Energía del movimiento armónico simple (tomado de Typler, 1993)

Físicamente, un concepto de gran utilidad es el de trabajo (W), que se define como el producto de la fuerza que actúa sobre un punto por el desplazamiento que se produce. Cuando fuerza y desplazamiento tienen la misma dirección, el W que se realiza se cuantifica con la siguiente ecuación:

$$W = \int F ds = -\Delta U$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -W = -\int_{s_1}^{s_2} F ds$$

$$dU = -F ds$$

La fuerza de la gravedad es una fuerza conservativa⁵. Si calculamos la Ep asociada a ella, la expresión resultante será:

$$W = \int F ds = \int (mgj) \cdot (dxi + dyj + dzk) = mgdy = \Delta U$$

$$U = U_0 + mgy, \text{ siendo } U_0 \text{ el valor de la energía potencial en } y=0.$$

La fuerza ejercida por un muelle es también una fuerza conservativa. Consideremos que en su posición de equilibrio la posición de un objeto unido a éste queda definida por la coordenada de posición $x=0$; para desplazarlo es necesario ejercer una fuerza igual y opuesta a la que ejerce el muelle, de modo que éste se va a extender. El trabajo ejercido por la fuerza aplicada es:

$$W = \int F ds = \int_0^x kx dx = \frac{kx^2}{2}$$

De modo que en equilibrio, $x=0$ y la energía del sistema es nula.

¿Qué ocurre cuando un cuerpo sujeto a un muelle oscila? En ese caso, una fuerza externa desplaza al cuerpo y hace que el sistema acumule energía en forma de energía potencia. Cuando desaparece la fuerza externa, el cuerpo comienza a ganar velocidad y se mueve hacia su posición de equilibrio, de tal modo que la energía potencial original se va transformando en energía cinética (Ec), aunque en todo momento la suma de ambas se mantiene constante. En uno de los extremos, cuando cambia de sentido el movimiento, la velocidad del cuerpo es nula, y por ello toda su energía es potencial; en cambio la velocidad es máxima al pasar por el punto de equilibrio, y en ese instante toda la energía es cinética.

Las expresiones que nos permiten determinar el valor de cada una de estas energías son las siguientes:

- E.potencial: $U = Ep = \frac{1}{2}kx^2$
- E. cinética: $Ec = \frac{1}{2}mv^2$

⁵ Fuerzas conservativas: cuando el trabajo total que realizan sobre una partícula es cero cuando la partícula recorre una trayectoria cerrada y vuelve a su posición original (Typler, pág. 148).

- E.total: $E = U + Ec = Ec = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$

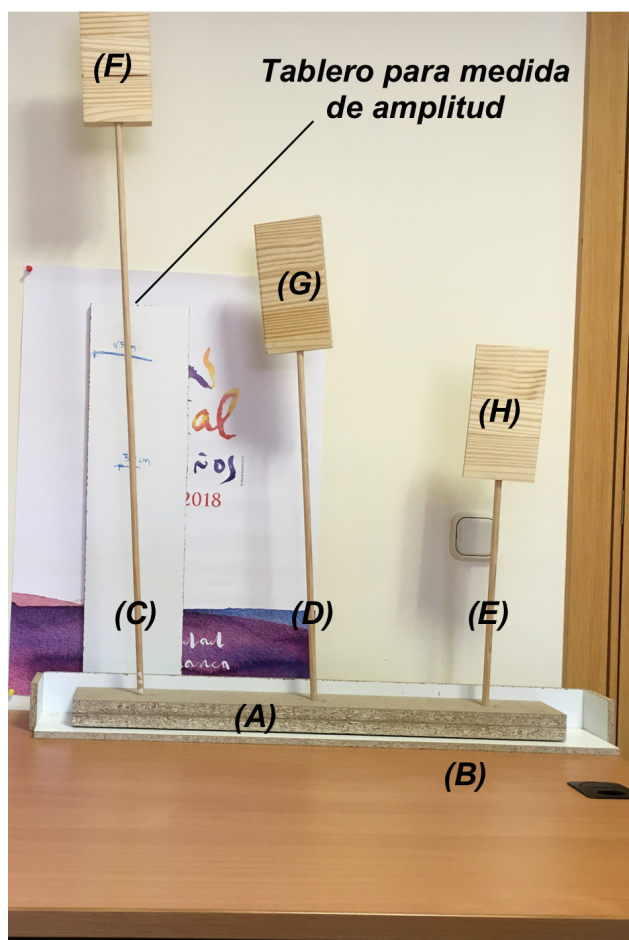
En el extremo de la oscilación, cuando ésta alcanza su amplitud máxima, $v=0$ y $x=A$, de modo que: $E = U + 0 = \frac{1}{2}kA^2$

A su paso por el punto de equilibrio, $x=0$, toda la energía es cinética, de modo que:
 $E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = 0 + \frac{1}{2}mv^2$

II.2 La frecuencia natural de los edificios y su relación con los efectos de los terremotos

Con esta actividad, basada en Teaching Engineering (https://www.teachengineering.org/activities/view/wst_natfreq_activity1), se muestra a los alumnos que ante un mismo evento sísmico, los edificios responderán, entre otros muchos factores, según su periodo o frecuencia natural. La pregunta a formular es: ¿Por qué un

determinado terremoto ha dañado considerablemente grandes edificios, pero ha dejado intactas las viviendas más sencillas?. El modelo sobre el que se apoya esta explicación (Figura 6) simula la respuesta diferencial de tres edificios, cada uno de ellos con su propia frecuencia natural- ante un mismo evento sísmico.



Material

- (A) Dos tablas de madera de 720 x 100 x 19 mm
- (B) Fieltro adherente de 250 x 90 mm como base deslizante.
- (C, D y E) Tres varillas de madera de 9 mm de diámetro y longitudes 834, 527 y 340 mm.
- (F, G y H) Tablilla de madera rectangular, de dimensiones 200 x 100 x 20 mm.
- (I) Cronómetro.

Figura 6. Modelo de tres estructuras de alturas diferentes. La correspondencia de las letras insertadas en la imagen se recoge en el apartado de Material.

Montaje

1. Apilar las dos tablas (A) y pegarlas entre sí con cola de madera.
2. Realizar tres perforaciones en (A), no pasantes y con la broca del 9, centrando una de ellas y dejando las otras dos a ambos lados de la primera y de manera simétrica.
3. En la parte inferior de (A), y a la altura de las tres perforaciones superiores, se adhieren tres tiras de fieltro adherente (B), de modo que (A) se pueda deslizar más fácilmente sobre su base.

4. En (A) se introducen las tres varillas (C, D y E), y en el extremo de cada una de ellas se colocan las tablillas F, G y H.
5. Se cortan tres varillas de madera con una misma longitud.

Actividad

El objetivo es demostrar que la configuración estructural de un edificio condiciona su respuesta en lo que a su periodo de vibración se refiere. Para su consecución, el planteamiento parte de la visualización del efecto que una vibración genera bajo unas singulares pero reales circunstancias; en el caso elegido, la destrucción del Puente Tacoma (<https://www.youtube.com/watch?v=SzObC64E2Ag>) no existió componente sísmica alguna, pero dada su espectacularidad, resulta adecuado para introducir la importancia de conocer las características de vibración de una estructura y del fenómeno que induce las vibraciones.

Cuando el nivel del alumnado lo requiera, antes de dar paso a la parte experimental del modelo, pueden introducirse algunos conceptos físicos relacionados con el movimiento armónico simple o vibratorio: amplitud, periodo y frecuencia de un movimiento vibratorio, frecuencia natural de un sistema como dependiente de la rigidez del mismo y de su masa, y resonancia.

Por último, entra el juego el modelo de tres estructuras simuladas con varillas de tres alturas distintas, para cada una de las cuales se deberá determinar su periodo (T). Con él, se aplicarán tres vibraciones, cada una con un periodo determinado, y se observará la respuesta de cada estructura. ¿Es igual en todos los casos? ¿De qué depende? ¿Qué tipo de movimientos son más dañinos?

Enunciado

En la base de madera que se entrega, con la ayuda de tres varillas y una pequeña tabla de madera se van a representar tres edificios de distinta altura pero de masas muy similares. De manera experimental y con la ayuda de un cronómetro define el periodo o frecuencia natural de cada una de ellas. Posteriormente, y ya con el modelo y sus tres estructuras incorporadas, haz vibrar todo el modelo tres veces, aplicando cada vez un periodo de 1, 2 y 5 segundos. Observa la respuesta de los edificios y extrae consecuencias de todo ello.

Este modelo puede ampliarse para estudiantes de niveles avanzados con la introducción de un acelerómetro para la cuantificación de los efectos de las vibraciones.

Resolución

Con las tres estructuras montadas, se procede a medir el periodo o frecuencia natural de vibración de cada una de ellas.

En todas ellas, apoyando un rotulador o lapicero en la intersección bloque-varilla, y estando el sistema en reposo. Posteriormente se desplaza todo el sistema hacia la derecha, marcando un punto en la posición en la que se va a dar comienzo la vibración.

Con la ayuda del video grabado, se determina el tiempo en el que cada estructura completa un ciclo de vibración, y sobre un plano vertical se mide la amplitud inicial del movimiento en su inicio ($t=0$ s)(ver [Figura 6](#)).

A continuación se muestran los datos recogidos en uno de estos experimentos ([Tabla 3](#)):

ESTRUC	ALTURA (mm)	MASA (g)	MASA VARILLA (g)	MASA TOTAL (g)	AMPLIT UD (cm)	Nº CICLOS/ TIEMPO	PERIODO (s)	FREC. (s^{-1})
1	834				15	7/6	0,86	1,16
1		266,16	40,5	306,66	10	7/6	0,86	1,16
2	527	264,80	27,03	291,83	9,5	10/5	0,5	2
3	340	262,93	17,70	280,63	3,4	5/2	0,4	2,5

Tabla 3. Resultados recogidos durante la excitación de las tres estructuras: la 1 en dos ocasiones, la 2 y la 3.

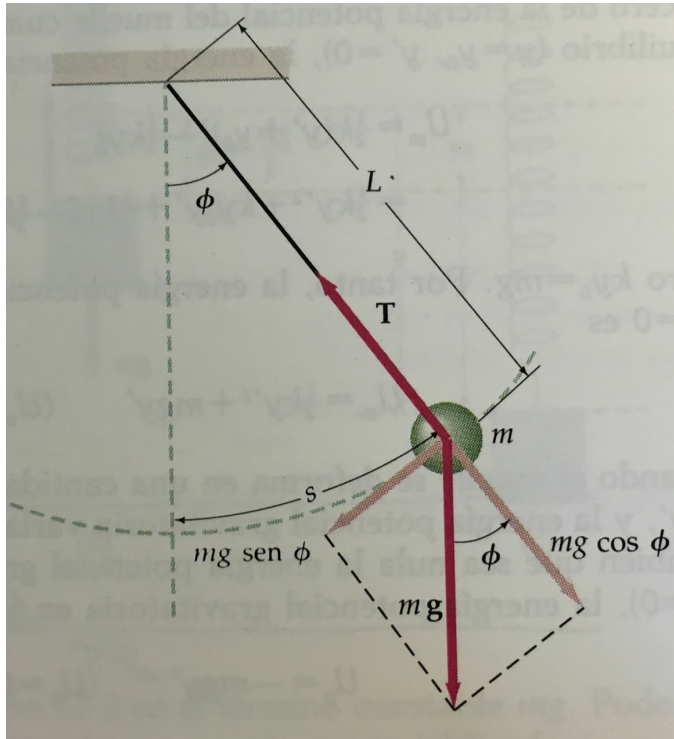
Posteriormente, se empuja todo el sistema cíclicamente a izquierda y derecha, con las tres estructuras montadas, generando así su oscilación. En un primer momento el ciclo es de un periodo alto o frecuencia baja, y poco a poco se va aumentando esta última (o disminuyendo el periodo). Se comprueba cómo la estructura más alta es más sensible ante eventos de baja frecuencia, mientras que las más altas lo son a frecuencias más elevadas. Además, se comprueba que cuando el periodo natural de la estructura se acerca al del movimiento, tiende a producirse resonancia, amplificando enormemente el movimiento de oscilación.

Sinopsis teórica de los conceptos a tratar

El péndulo simple (tomado de Typler, 1993)

En ingeniería la mayor parte de las vibraciones se representan mediante un m.a.s.; pero hay otras vibraciones que aunque siendo algo diferentes, se aproximan por medio de un m.a.s. Por ejemplo, un péndulo, esto es, una plomada de masa “m” colgada en el extremo de un cable de longitud “l” y que tiene la posibilidad de oscilar en un plano vertical. Cuando la masa se aleja de su posición de equilibrio al girar un ángulo pequeño (Φ), actúan tanto el peso ($W=mg$) - en la vertical- y la tensión de la cuerda (T) -hacia el centro de giro-. Si

descomponemos el peso en sus componentes tangencial y radial al círculo que describe la masa al oscilar, las fuerzas tangenciales resultantes serían (Figura 7):



$$\sum F_t = -mg \sin(\Phi) = m \frac{d^2 s}{dt^2}$$

Si a la longitud de la cuerda le llamamos (l), el arco de giro (s) descrito por la masa cuando se aparta un ángulo (Φ) de su equilibrio es:

$$s = \varphi l$$

Aplicando la 2ª Ley de Newton sobre la componente tangencial del movimiento quedaría:

$$\sum F_t = -mg \sin(\varphi) = m \frac{d^2 s}{dt^2}$$

Figura 7. Descomposición de fuerzas en un péndulo simple (tomado de Tipler, 1993).

Siendo $s \ll l$, el ángulo $\Phi = s/l$ es pequeño, de modo que puede aceptarse la aproximación de que $\sin(s/l) \approx (s/l)$:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = -mg \sin(\varphi) = -g \sin\left(\frac{s}{l}\right)$$

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = -\frac{g}{l} s$$

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = -\omega^2 s$$

$$\omega^2 = \frac{g}{l}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{\frac{l}{g}}$$

De modo que el periodo depende de la longitud del péndulo, pero no de su masa: a mayor longitud, mayor periodo (T). Y esto es debido a que la fuerza restauradora es proporcional a la masa. Y (T) no depende de la amplitud de la oscilación.

Cuando la amplitud es importante el movimiento es periódico, pero no armónico simple, dependiendo el periodo de la amplitud.

Las oscilaciones amortiguadas (tomado de Tipler, 1993)

Cuando un movimiento oscilante tienen lugar en la realidad, éste no mantiene su amplitud constante, sino que va disminuyendo lentamente a medida que pasa el tiempo debido a la acción de fuerzas de fricción. Por ello, como la fuerza de rozamiento no es una fuerza conservativa, la energía del sistema va a ir disminuyendo. Este movimiento se denomina movimiento amortiguado. Un buen ejemplo de este tipo de movimientos nos lo puede dar un columpio que se pone a oscilar sin que intervenga posteriormente persona alguna en su movimiento, de tal modo que poco a poco vuelve a su posición original de equilibrio.

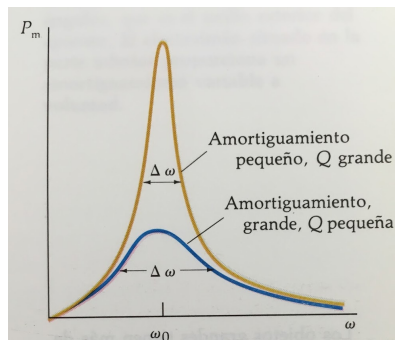


Figura 12-22 Gráficas de la potencia media cedida a un oscilador por una fuerza impulsora sinusoidal en función de la frecuencia angular ω de esta última para dos valores distintos del amortiguamiento. Se produce la resonancia cuando la frecuencia (angular) de la fuerza impulsora es igual a la frecuencia (angular) natural o propia del sistema, ω_0 . La resonancia es aguda cuando el amortiguamiento es pequeño.

En general, la fuerza de amortiguamiento puede considerarse como proporcional a la velocidad:

$$F_a = -bv$$

La segunda Ley de Newton:

$$F_x = ma_x$$

$$-kx - bv = m \frac{dv}{dt}$$

Figura 8. Cuadro de potencia media cedida en función del amortiguamiento y su relación con la frecuencia angular del sistema (tomada de Tipler, 1993).

La frecuencia natural de un oscilador se define como aquella que tendría si no actuase sobre él ningún amortiguamiento ni sistema impulsor. Pero si sobre el oscilador se introduce una energía adicional -evento sísmico en el caso que nos ocupa- a través de un impulso cuya frecuencia es similar a la natural del oscilador, éste aumentará la amplitud, alcanzando valores mucho mayores que la de la propia amplitud de la fuerza impulsora. Cuando la frecuencia impulsora es igual a la frecuencia natural la energía absorbida es máxima; a esta situación se la denomina **resonancia** (Figura 8). Retomando el ejemplo del columpio: cuando un niño se sube a él provoca fuerzas impulsoras que no son armónicas simples pero sí son periódicas. Cuando aprende a columpiarse, lo que ha conseguido es descifrar la frecuencia natural del columpio, y trasladarla a la fuerza impulsora que él mismo aplica: el columpio entre “en resonancia”.

II.3 Fallo de un edificio durante un evento sísmico

Objetivo del modelo

Mostrar experimentalmente y de una manera sencilla donde se encuentran algunas de las zonas más débiles de un edificio cuando se ve sometido a movimientos sísmicos.

Material

- (A) Depresores de lengua.

- (B) Tornillos pequeños para los nudos (diámetro 4 mm).
- (C) Tabla de madera de 400 x 40 x 30 mm.
- (D) Tornillos.
- (E) Taladro con broca de 4 mm para madera.

Montaje

1. Tomar 10 depresores (A).
2. Realizar dos perforaciones en los extremos de cada depresor (diámetro 4 mm).
3. Unir los depresores entre sí con (B) según la [Figura 9](#).
4. Unir la estructura de depresores a un listón de madera (C) con la ayuda de tres tornillos (D).

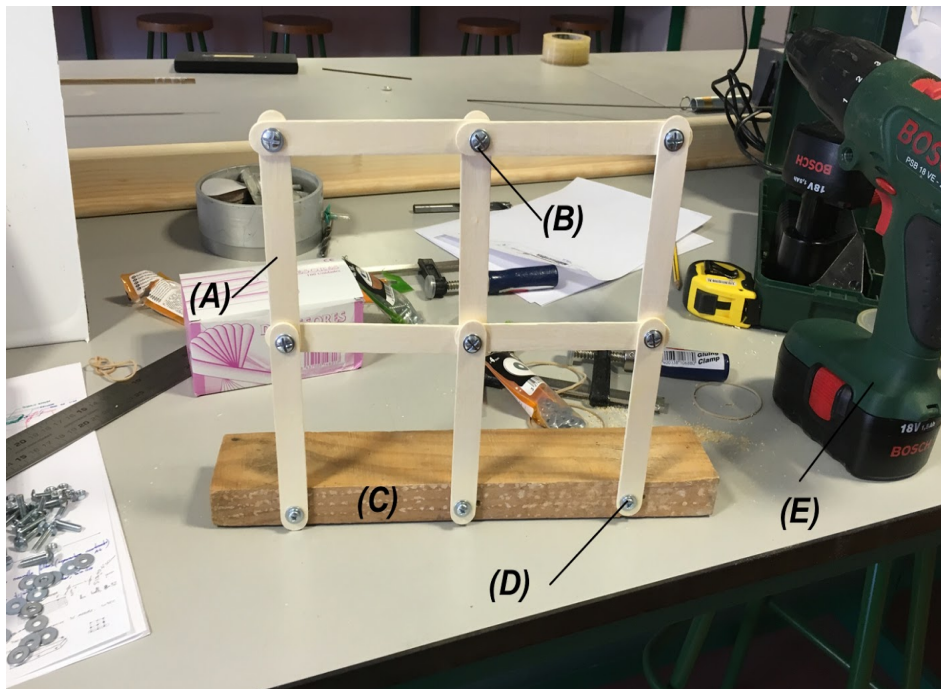


Figura 9. Esquema bidimensional de una estructura sencilla que se somete a acciones horizontales.

Actividad

Montar la estructura y moverla sobre la base del listón a un lado y a otro hasta que se produzca el desplazamiento de una planta sobre la otra.

Abrir un periodo de propuestas para, con la ayuda de depresores adicionales, clips, folios...mejorar el comportamiento de la estructura.

Sinopsis teórica de los conceptos a tratar

No es propósito de este proyecto profundizar en los aspectos estructurales de un edificios, pero sí se quiere dejar aquí constancia de los principales motivos de fallo de los edificios cuando se ven sometidos a acciones sísmicas.

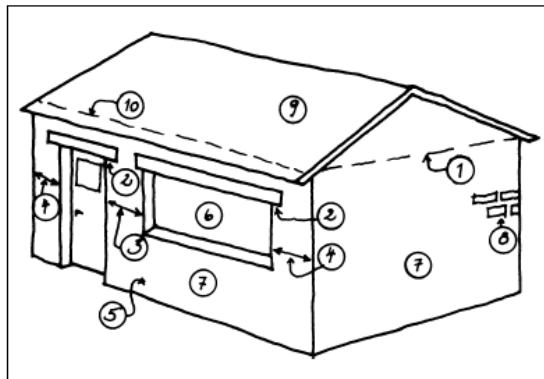
Una estructura de un edificio real dista mucho de la simulada con los depresores de madera, y por lo tanto, los fallos de las primeras no tienen por qué producirse también en la segunda. pese a todo, se considera interesante dar algunas nociones en relación a los fallos más habituales relacionados con sismos. Por su simplicidad y posibilidad de acceso, se han considerado dos publicaciones como de interés: Moreno (2014) y Minke (2005). De ambas proceden las ideas que a continuación se exponen.

Principales daños por sismos en edificios con estructuras porticadas de hormigón armado con muros de carga.

En su inventarios de daños observados en los edificios afectados por los efectos de terremotos en República Dominicana, Moreno (2014) establece la siguiente tipología de roturas:

- Roturas de columna: por fallo a flexión a cortante.
 - Roturas de columna, por fallo a cortante.
 - Rotura en cabeza de columna o nudo rígido, a cortante, produciendo el desgarre del hormigón.
- Roturas de muro:
 - Rotura de muro por cortante ante la escasez de armadura.
 - Rotura en muro por aplastamiento de las plantas superiores.
- Rotura de viga: generalmente asociada a vigas con aceros mal dimensionados (falta o insuficiencia de aceros para momentos negativos y para estribos).
- Rotura en zona de juntas de expansión por aumento de la rigidez global del edificio.
- Colapso general del edificio.

De una manera general, en el caso de edificios de tierra (adobe por ejemplo), los posibles fallos los muestra Minke (2005) a partir del esquema de la [Figura 10](#):



4-7 Errores estructurales que provocan riesgos de derrumbe durante un sismo

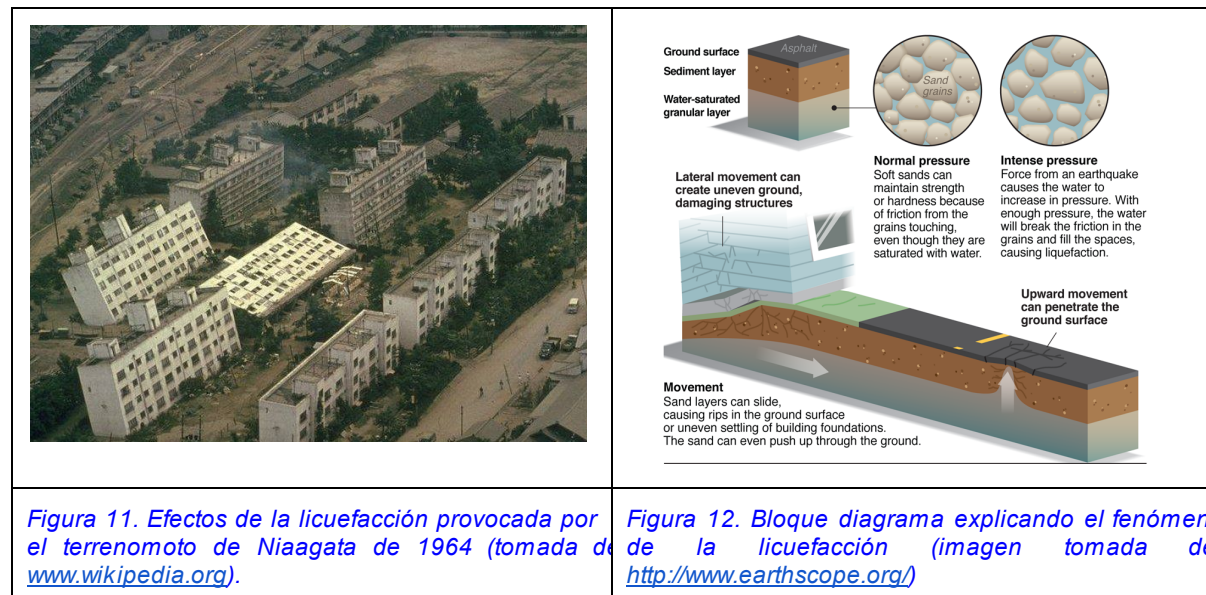
1. Ausencia de un refuerzo horizontal (encadenado, collarín o viga cadena)
2. Los dinteles no penetran suficientemente en la mampostería
3. El ancho de muro entre los vanos de la ventana y la puerta es demasiado angosto
4. El ancho entre los vanos de la ventana y la puerta en relación a las esquinas es demasiado angosto
5. Ausencia de un sobrecimiento (zócalo)
6. El vano de la ventana es demasiado ancho
7. El muro es muy largo y delgado sin tener elementos de estabilización
8. La calidad de la mezcla del mortero es pobre (con una baja capacidad aglutinante), las uniones verticales no están completamente rellenas, las uniones horizontales son demasiado gruesas (más de 1,5 cm)
9. La cubierta es demasiado pesada
10. La cubierta tiene un arriostramiento débil con el muro

Figura 10. Principales fallos estructurales en una estructura de tierra afectada por sismos (tomada de Minke, 2005).

II.4 Licuefacción de un suelo arenoso saturado

La licuefacción es un proceso que se genera en algunos suelos de naturaleza arenosa o areno limosa, saturados, y que se ven sometidos a acciones sísmicas; éstas provocan un aumento brusco de la presión del agua intersticial existente en los poros del suelo, lo que reduce o incluso llega a anular la resistencia del suelo. Como consecuencia, las estructuras que se cimentan en este tipo de suelos pueden sufrir movimientos que en algunos casos, las hacen colapsar (Figura 11); también se manifiesta este fenómeno con la salida de agua a la superficie

La presión de poros aumenta debido a que la vibración facilita el reordenamiento de las partículas granulares del suelo, provocando una densificación del terreno. Ello implica que en éste se reduzca el volumen de huecos, siempre que el agua que los ocupaba pueda migrar (Figura 12). Si las vibraciones son de tal frecuencia que hacen que al agua no le dé tiempo a moverse para dejar los huecos a las partículas sólidas, el agua aumenta su presión (u), y consecuentemente, la presión vertical efectiva (σ') sobre el terreno va a disminuir.



El modelo a emplear (Figura 13 y Figura 14) pretende simular el proceso de licuefacción en terrenos granulares finos, que frecuentemente se da durante eventos sísmicos. En este contexto, los suelos susceptibles de licuefactar pierden bruscamente resistencia al corte, y con ello su capacidad portante cae drásticamente. Cuando esto ocurre pueden dañarse gravemente los cimientos de las estructuras.

Material

- (A) urna de metacrilato.
- (B) balanza de más de 10 kg de capacidad.
- (C) arenas de granulometría comprendida entre 0,2 y 0,6m.
- (D) agua para saturar las arenas.
- (E) regla o calibre.

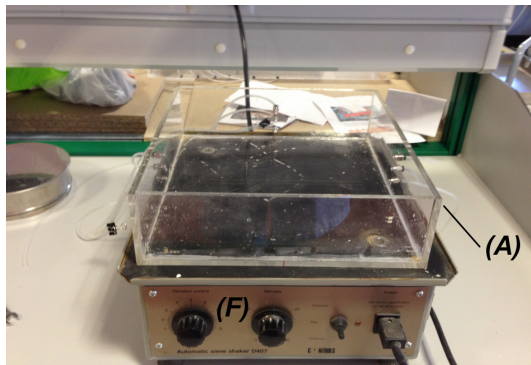
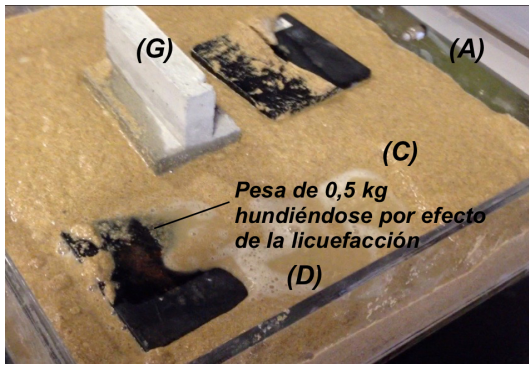
- (F) mesa vibradora.
- (G) zapata de hormigón en miniatura.

Montaje

1. Pesar (A) vacía con la ayuda de (B).
2. Llenar (A) con (C) hasta al menos tres cuartas partes de la altura.
3. Añadir agua (D) sin que ésta rezume por encima de la superficie de la arena. Enrasar la superficie y medir el espesor de arena resultante con (E).
4. Colocar (A) sobre (F), y en la superficie apoyar (G).
5. Poner en marcha (F), primero con movimiento de pequeña amplitud, y luego aumentarla.

De manera opcional, se puede colocar adherido a la zapata un acelerómetro con el que registrar con la ayuda de un Arduino las vibraciones que se generan.

El modelo puede verse en: <https://www.youtube.com/watch?v=oWDHjKKqVEk>

	
<p><i>Fotografía 13. Modelo físico sobre una mesa vibradora. Se simula un terreno granular semisaturado sobre el que existe una estructura cimentada.</i></p>	<p><i>Fotografía 14. Zapata corrida y pesas de 500 g parcialmente hundidas por la pérdida de capacidad portante durante el evento sísmico. El agua aflora en superficie.</i></p>

Actividad

Con la ayuda del material aportado, crea un modelo de terreno formado por arenas de compacidad suelta y saturadas. Cuando esté listo, indica su densidad inicial, y coloca en el centro una zapata corrida o cualquier objeto que pueda simular una estructura, instrumentada con un acelerómetro. Simula con la ayuda de la mesa vibradora tres eventos sísmicos de intensidad creciente, y observa para cada caso la reacción de los diferentes elementos del modelo (descriptiva y cuantitativa). Con todo ello, elabora un pequeño informe en el que se describa la experimentación realizada y en el que se lleguen a conclusiones relacionadas al tipo de evento que genera la licuefacción del suelo.

Sinopsis teórica de los conceptos

La capacidad de resistir esfuerzos cortantes (τ) es una de las características que diferencia a los suelos del agua. En Mecánica de Suelos, la ley que rige esta resistencia la marca la siguiente expresión:

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan(\varphi')$$

siendo c' y φ' la cohesión efectiva y el ángulo de rozamiento interno del suelo, ambos parámetros que definen la resistencia de un suelo.

Por otro lado, la presión efectiva (σ') depende, según la Ley de Terzaghi, de la presión total (σ) y de la presión del fluido intersticial (u) existente en los huecos de un suelo, estando todas estas presiones relacionadas por la expresión:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Por lo tanto, la resistencia al corte de un suelo se puede expresar también como:

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan(\varphi') = c' + (\sigma - u) \cdot \tan(\varphi')$$

Los suelos en los que se puede dar la licuefacción, generalmente granulares, son suelos sin cohesión - o cuando existe muy pequeña-, de modo que toda su resistencia al corte depende del ángulo de rozamiento y de la presión efectiva existente. Si se observa la expresión anterior, cuando la presión de poros (u) aumenta debido a las vibraciones sísmicas, el segundo miembro de la ecuación se reduce, de tal modo que la resistencia al corte pasa a ser menor.

¿Todos los suelos granulares tienen la misma posibilidad de licuarse?

No, depende de la granulometría que tengan, es decir, de la distribución de tamaños de sus partículas. En general, cuanto mayor uniformidad de tamaños, mayor potencial de licuarse va a tener el suelo; si la uniformidad es menor, las partículas de menor tamaño rellenarán los huecos más grandes, de modo que la posibilidad de reducir volumen va a ser menor.

Referencias adicionales:

Robertson, P.K. (2015). Evaluation of Soil Liquefaction – How Far Have We Come in". Conference at the Geo-Institute of ASCE. Consultar en: <https://youtu.be/J2-tMdbMvNg>.

García, J (2007). Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación a Tumaco (Colombia). Tesis Doctoral. U.Politécnica de Cataluña. Accesible en la red a través de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6249/03JRgn03de03.pdf;jsessionid=3A07D8F130CC3750365DD6142E87F1A4.tdx1?sequence=3>

III. MODELO FÍSICO PARA RECREAR EVENTOS SÍSMICOS

III.1 Introducción

Una mesa vibradora (*shaking table*) es un instrumento de experimentación construido con el fin de simular eventos sísmicos de distinta magnitud y estudiar sus efectos en el terreno y/o estructuras en el que ocurren. Generalmente constan de una parte fija o plataforma base en la que se ancla el dispositivo que genera la vibración, y una parte móvil sobre la que actúa ésta y que está apoyada a través de uniones flexibles a la plataforma base. En función del uso que se vaya a dar, existen mesas vibradoras muy complejas y de gran coste y tamaño, llegando a alcanzar unas dimensiones de 6 x 6 m²; y otras muchas más sencillas, de dimensiones decimétricas, y que persiguen un fin principalmente pedagógico.

Además de por sus dimensiones, uno de los principales aspectos de una mesa vibradora es la definición de sus grados de libertad, definido por el número de parámetros independientes que definen su configuración, y que permiten movimientos más o menos complejos. Las más avanzadas permiten hasta seis grados de libertad (x, y, z, y los giros alrededor de cada uno de los ejes mencionados).

	AZALÉE	EPS ZAMORA
DIMENSIONES	6x6 m	0,4 x 0,4 m
MASA DE LA MESA	25 tons	9 kg
EJES DE MOVIMIENTOS	X-Y-Z	X*-Y-Z*
MÁXIMOS DESPLAZAMIENTOS	X ± 125 mm	X ± 20 mm
	Y ± 125 mm	Y ± 30 mm
	Z ± 100 mm	Z ± 10 mm
MÁXIMA ACELERACIÓN	1 g	3 g

Tabla 4. Geometría y características de la mesa vibradora Azalée (tomado de <http://www-tamaris cea.fr/html/en/tests/azalee.php>).(*): movimiento parcialmente limitado.

III.2 Planificación

En la primera fase del proyecto se establecieron una serie de criterios a seguir para la diseñar y construir el primer prototipo de mesa vibradora de la EPSZ. Éstos fueron:

- manejabilidad: para poder ser transportada y montada en poco tiempo - menos de una hora- y por una o dos personas.

- priorizar el carácter didáctico frente a opciones más avanzadas o de objetivos más dentro del ámbito de la investigación.
- ajuste al presupuesto.

A partir de ahí se hizo una búsqueda *online* de posibles modelos a seguir. Los recursos encontrados, principalmente videos aunque también artículos, se recogen en el listado siguiente (Tabla 5).

RECURSO	COMENTARIO	FUENTE
Building the shake table Mitchder Films	Modelo sencillo pero algo enrevesado. Difícil de acoplar la urna	https://www.youtube.com/watch?v=Fp1-Hcb34KE&list=PLRFJGKOuz75YyIvTrdBctMyd6d79VaU9N&index=13
Resonance of buildings François Tilquin	Modelo elegante y sencillo para probar las estructuras y el efecto de la resonancia. Sin capacidad para trabajar con modelos del terreno incorporados.	https://www.youtube.com/watch?v=pMr1MzSv044&index=16&list=PLRFJGKOuz75YyIvTrdBctMyd6d79VaU9N
Shake that Building - What Did You Learn in School Today? Science Bridge	Modelo con maquinaria sencilla, carácter educativo y orientado a la mecánica y parte física.	https://www.youtube.com/watch?v=6CIIS8p3Br4&list=PLRFJGKOuz75YyIvTrdBctMyd6d79VaU9N&index=14
Shake Table. Linda Bobzien	Modelo a seguir, adaptando la urna en parte superior y modificando los muelle.	https://www.youtube.com/watch?v=lahmK6x7ZAw&list=PLRFJGKOuz75YyIvTrdBctMyd6d79VaU9N&index=15

Tabla 5. Algunos de los principales recursos que han servido de base para el diseño de la mesa vibradora.

Finalmente se optó por construir una mesa vibradora en la que poder emplazar el modelo del terreno contenido dentro de una urna de metacrilato.

III.3 Diseño y construcción

El primer diseño se realizó a mano alzada a partir de las anotaciones e ideas tomadas de los modelos de referencia mencionados en el apartado anterior. A partir de ahí, y con la colaboración de José Ángel Alonso Llamas y Jesús de la Concepción- personal de los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Zamora-, se construyó el modelo definitivo (Figura 15).

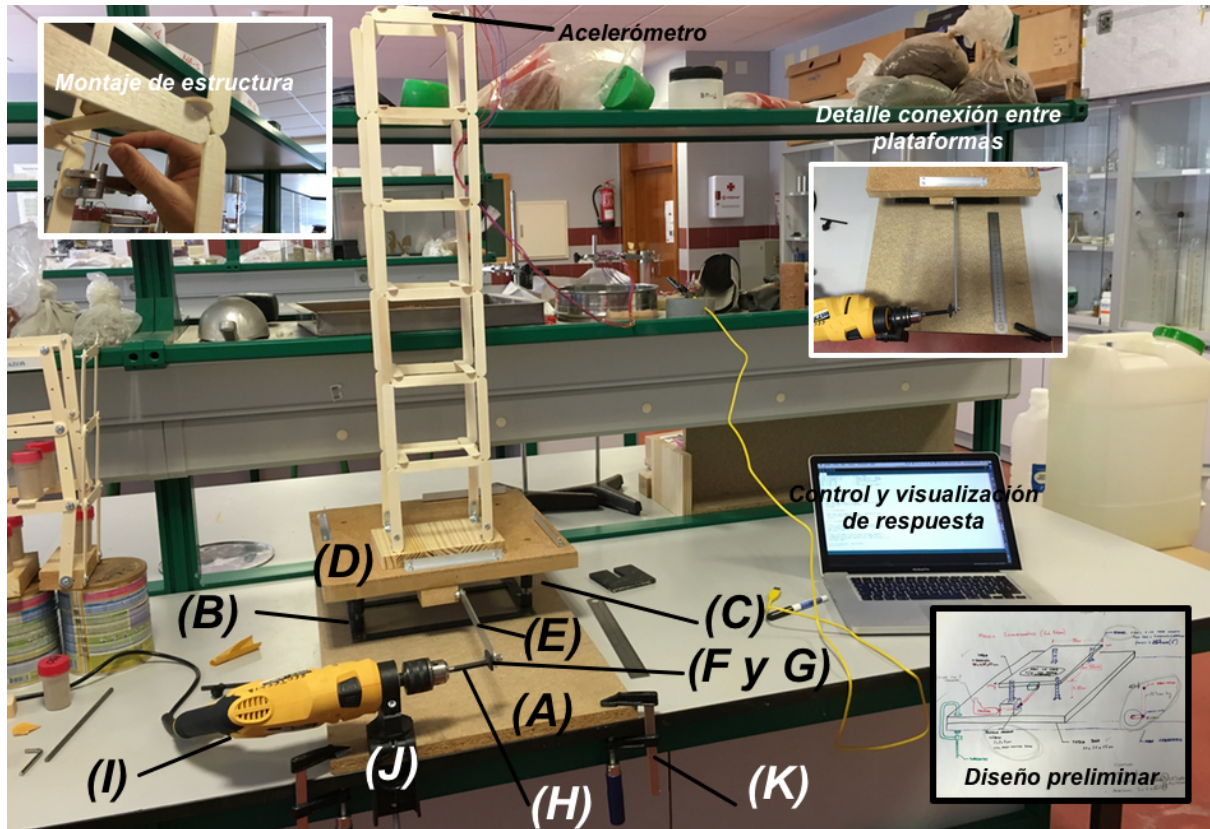


Figura 15. Mesa vibradora construida para este proyecto, y diseño preliminar.

Material

- (A) Tablero de aglomerado de 700 x 405 x 19 mm (plataforma base), con cuatro perforaciones de ϕ 6 mm colocadas sobre la superficie mayor y espaciadas entre ellas 280 mm en la dirección X, 225 mm en la dirección Y, y con una quinta situada en el centro de todas las anteriores.
- (B) Estructura metálica de forma cuadrada, formada por cinco barras de acero de dimensiones 300 x 19 x 2 mm (2), y 260 x 19 x 2 mm.
- (C) Cinco apoyos de sinenblock a modo de soporte cilíndrico, de eje ϕ 6 mm (macho y hembra, de 20 mm).
- (D) Tablero de aglomerado de 400 x 400 x 28 mm (Plataforma superior), cinco perforaciones distribuidas de manera que se alineen en planta con las realizadas en la plataforma base.
- (E) Elemento de unión entre la plataforma superior y el brazo motor.
- (F) Placa metálica de 280 x 20 x 2 mm (brazo motor), con dos perforaciones de ϕ 6 mm en sus extremos.
- (G) Placa metálica de 33 x 20 x 2 mm (elemento de enlace rotor-brazo) con dos perforaciones de ϕ 6 mm.
- (H) Cilindro metálico de ϕ 6 mm como convertidor de movimiento circular en movimiento lineal

- (I) Taladro (generador de los eventos sísmicos) con regulación de velocidad manual y con adaptador para poder fijarlo.
- (J) Anclaje para el taladro.
- (K) Cuatro sargentos para asegurar la unión entre el brazo motor y la plataforma superior, y la plataforma base.

Para simular el terreno licuefactable se ha empleado arena de río con una granulometría controlado y definida por los tamices 0,6 y 0,2 mm, para lo cual se emplearon sendos tamices.

La colocación de la arena y el agua para su saturación en la urna se efectuó según lo indicado en el apartado II.5 dedicado a la licuefacción.

La estructura

Las estructuras se construyeron con depresores de madera adquiridos en una farmacia, y unidos entre sí a través de cola para madera. Como cimiento se emplearon paralelepípedos de madera, con un elemento metálico en forma de escuadra para solidarizarlo a la estructura y con la ayuda de una sujección con arandelas y tornillería. El prototipo y los modelos construidos - Modelo 1. Edificio de dos alturas; Modelo 2. Edificio de cinco alturas apoyado sobre zapatas; Modelo 3. Edificio de cinco alturas apoyado sobre losa - se muestran en la [Figura 16](#).

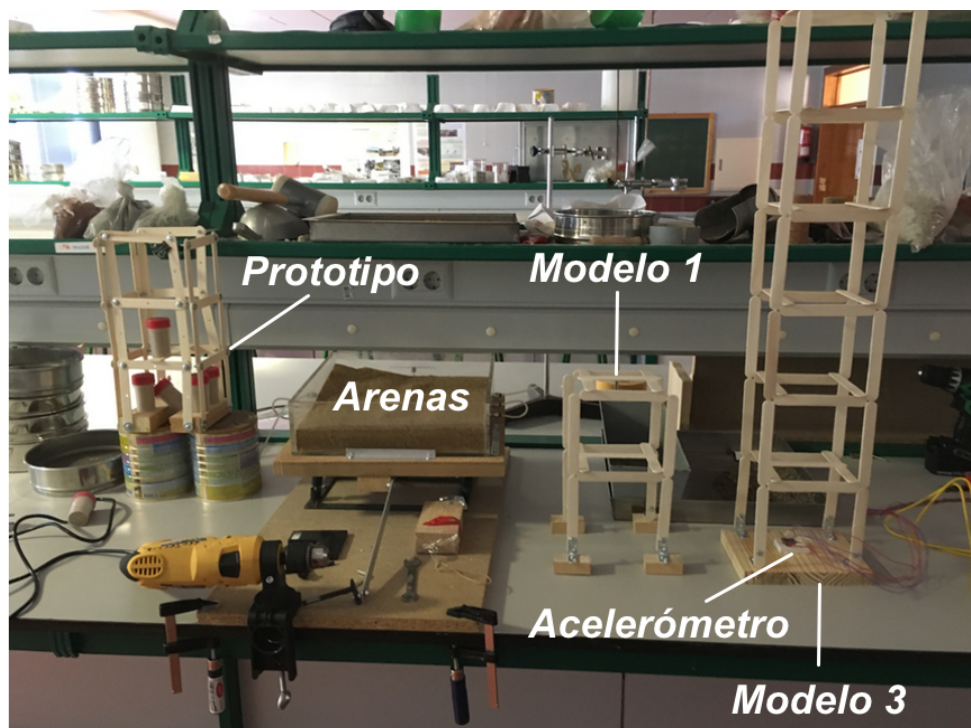


Figura 16. Estructuras construidas para los modelos.

La auscultación

Para cuantificar los eventos sísmicos se optó por instalar un acelerómetro conectado a su vez a un Arduino (Figura 17) y a un ordenador portátil que actúa como fuente de alimentación y, a la vez, de visualización de los datos. El modelo de acelerómetro empleado ha sido el ADXL 335

Este equipo, desde su activación a través del ordenador, toma datos del valor de los tres componentes de la aceleración de la gravedad (a_x , a_y y a_z), siendo ésta última la única componente vertical. De este modo, en reposo, las lecturas tienen que ser de 0 m/s^2 para a_x , a_y , y de $1,00 (9,81 \times 1) \text{ m/s}^2$. En la Figura 18 se muestra un acelerograma obtenido durante la realización de este trabajo.

En el apartado “Sinópsis teórica...” se profundiza más en este aspecto.

Actividad

Con la ayuda de la mesa vibradora, pero sin simular modelo de terreno alguno, genera y registra tres eventos vibratorios (sismos) de intensidad creciente, y representa las aceleraciones de los movimientos generados. Posteriormente, con la ayuda de la urna de metacrilato, representa un perfil del terreno formado por un suelo granular de categoría CIV según la norma Sismorresistente NCSE-02 (M.Fomento, 2002), y, tras colocar dos de las tres estructuras construidas (o cualquier otra que los alumnos puedan idear), repite la secuencia de vibración anterior, colocando ahora el acelerómetro en la zona más baja posible del edificio. Empleando acelerogramas, representa las aceleraciones medidas en cada uno de los tres eventos, compáralas con las que a tenor de la Norma española se generarían en el mismo perfil ubicado en Lorca, y ubicado en Zamora (aceleraciones de cálculo). Finalmente, haz referencia al comportamiento de cada tipo de estructura, y en cada evento.

Otras ideas a desarrollar con la colaboración de otros profesores:

- concurso de diseño de estructuras sismorresistentes, tomando como referencia los concursos habituales que con este fin se hacen cada año en diversas universidades americanas y asiáticas.
- con la ayuda de un programa informático adecuado, simula el comportamiento que la estructura que cada grupo construya va a tener frente a un determinado evento sísmico a simular con la ayuda de la mesa de vibración
- Aporta la información sísmica de Lorca y explorar los datos de un acelerograma

Sinopsis teórica de los conceptos a tratar

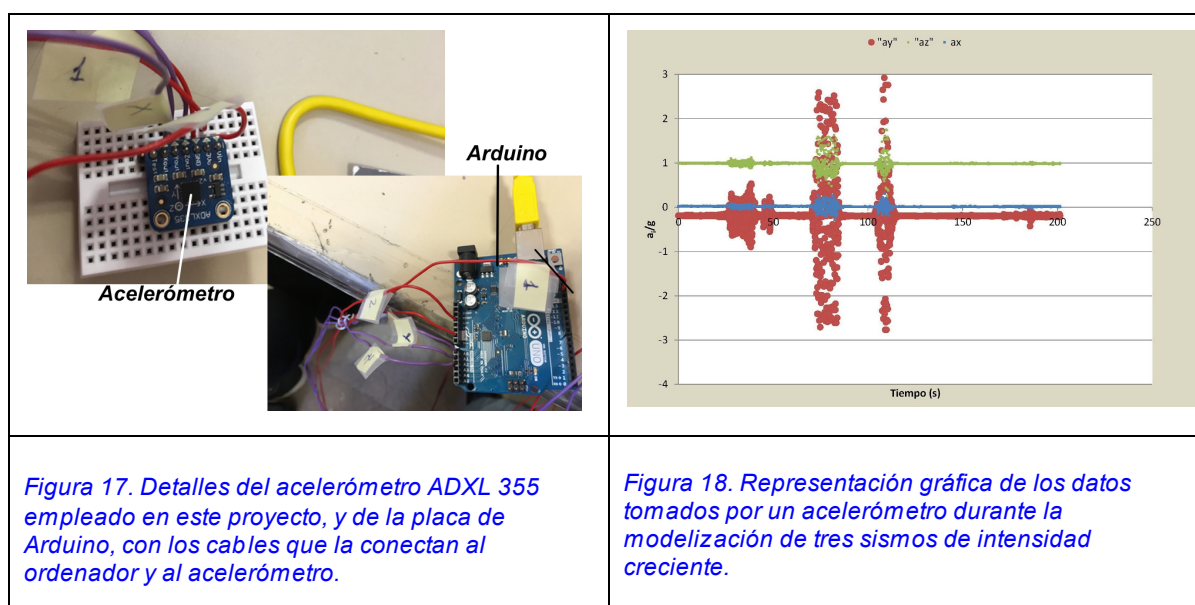
El acelerómetro

Un acelerómetro es un instrumento que mide la aceleración del cuerpo o del sistema en el que se emplaza, entiendo la aceleración como proporcional a la fuerza (peso) que

actúa sobre éste. Los hay de distintos tipos, de entre los que destacaremos el de tipo capacitivo.

En este tipo de acelerómetros lo que se mide realmente son cambios de potencial asociados a la variación en el espacio existente entre dos placas conductoras separadas por un material dieléctrico, lo que constituye un condensador. Cuando este espaciado varía, lo hace proporcionalmente también la respuesta eléctrica. La correcta calibración de este sistema permite extrapolar el movimiento.

En este trabajo se ha empleado el modelo ADXL 335, compatible con Arduino (Figura 17); es pequeño, fino y de poco consumo, de 3 ejes y con salidas de voltajes condicionados. De él salen tres cables violetas, conectados a X, Y y Z, y que van a la placa de Arduino (Analog Input, A0, A1 y A2) y dos cables rojos, que se conectan con GROUND, GND. La aceleración la mide en un rango de $\pm 3g$. El usuario selecciona el ancho de banda del acelerómetro utilizando los capacitores CX, CY y CZ. El ancho de banda puede cambiarse en función de la aplicación que queramos darle, con un rango de 0.5 Hz hasta 1600 HZ para los ejes X e Y, y rango de 0.5Hz a 550 Hz en el eje Z.



Arduino

Se trata de una plataforma de hardware libre, formada por un microprocesador y un entorno de desarrollo para poder aplicar este dispositivo a distintas disciplinas (Figura 17). Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino

se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino.

Aceleración Espectral (SA)

Aceleración experimentada por un edificio al modelizarse como una partícula con toda su masa concentrada y colgado de una varilla sin masa con el mismo periodo de vibración natural que el de un edificio.

Aceleración de pico (PGA)

Comúnmente se recurre a la escala de Richter para estimar la magnitud de la energía liberada en un terremoto; sin embargo, la energía liberada no se corresponde siempre con la fuerza de sus ondas sísmicas y que causan los daños en los edificios. Estos daños son proporcionales a los movimientos que se generan en el terreno y por lo tanto, desde el punto de vista ingenieril este dato es extremadamente importante. Para considerarlo se trabaja con lo que se denomina **aceleración de pico de un terremoto**, *Peak Ground Acceleration* (PGA), es la amplitud de la máxima aceleración absoluta registrada en un acelerograma durante un terremoto en un determinado lugar (https://en.wikipedia.org/wiki/Peak_ground_acceleration). Varía con la geología y con la distancia al epicentro, de manera que para un mismo terremoto se pueden tener diferentes PGA values⁶. Se mide con la ayuda de acelerómetros, y suele dividirse en sus componentes horizontal y vertical. La componente vertical suele denotarse como V o UD (Up-Down)

La más utilizada es la PHA, Peak Horizontal Acceleration, que se mide a su vez en dos direcciones: H1 o NS y H2 o EW.

El PGA es un parámetro adecuado para diseñar edificios con menos de 7 plantas (<http://geohazards.usgs.gov/deaggint/2002/documentation/parm.php>). Sabiendo que la aceleración de la gravedad toma un valor de $9,81 \text{ m/s}^2$, una medida de $0,01 \text{ m/s}^2$ se corresponderá con un valor de $0,001g$, esto es, una milésima del valor de g .

Algunos valores que pueden servir de referencia se muestran en la [Tabla 6](#):

ACELERACIÓN MEDIDA	OBSERVACIONES
$0,001g$ ($0,01 \text{ m/s}^2=1 \text{ Gal}$)	Perceptible por la gente.
$0,02g$ ($0,2 \text{ m/s}^2$)	Las personas pierden el equilibrio.
$0,5 g$	Edificios bien diseñados pueden llegar a soportar el evento siempre que éste sea corto.

⁶ Por contra, a un terremoto le corresponde sólo una valor de magnitud en la escala de Richter.

> 1,24 g	Intensidad 10 en la escala de la PGA
----------	--------------------------------------

Tabla 6. Relación entre las aceleraciones medidas en un terremoto y los efectos que se perciben.

Ingeniería Sísmica

La ingeniería sísmica es una rama de la ingeniería que se dedica al estudio del comportamiento de las estructuras frente a las vibraciones que generan los terremotos. Se nutre de conceptos físicos, mecánicos y geológicos principalmente, y se imparte en titulaciones o Grados como Ingeniería Geológica, Ingeniería Industrial, Arquitectura o Ingeniería Civil.

Aunque existen otras más específicas, en España la normativa que trata las acciones sísmicas es la NCSE-02, *Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación*. Esta norma expone como objetivo el de “proporcionar los criterios que han de seguirse dentro del territorio español para la consideración de la acción sísmica en el proyecto, construcción, reforma y conservación de aquellas edificaciones y obras a las que le sea aplicable...”. Su articulado se divide en cuatro capítulos y un anejo. Dejando al margen el Capítulo 1. Generalidades, y el Capítulo 4. Reglas de diseño y prescripciones constructivas, a continuación se presentan los aspectos más relevantes que se deben resolver.

Información sísmica (Capítulo 2 NCSE-02)

El Capítulo 2. Información Sísmica aporta las pautas y cálculos a seguir para determinar una serie de parámetros clave para el desarrollo del Capítulo 3. Todo proyecto, en su apartado de acciones sísmicas, debe definir la aceleración de cálculo a considerar (a_c). En la [Tabla 7 se recogen los datos a recabar para poder definirla adecuadamente](#).

SÍMBOLO		NOMBRE	FUNCIÓN DE	
	k	coeficiente de contribución	Localización geográfica (Anejo 1 si $a_b \geq 0,4g$)	
a_c	$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$			
	a_b	valor característico de la aceleración horizontal en la superficie del terreno		
	ρ	coeficiente adimensional de riesgo	f(construcción)=1,0-1,3	
	S	coeficiente de amplificación del terreno.	f (a_b, ρ, C) localización,	Tiene en cuenta la

			construcción y terreno	diferencia de aceleración sísmica ⁷ en superficie respecto a la de un suelo duro.
	C	coeficiente de terreno	$f(V_s, e_i)$	Si $C > 1,8$, $\alpha(T) = 2,5$ para $T > T_B$
$\alpha(T)$		valor del espectro normalizado de respuesta elástica	$\alpha(T) = 1 + 1,5 \frac{T}{T_A}$ $\alpha(T) = 2,5$ $\alpha(T) = K \frac{C}{T}$ $f(\text{terreno y oscilador})$	
	T	periodo propio del oscilador (en segundos)		
	T_A	periodo característico del espectro (en segundos)	$T_A = K \frac{C}{10}$	Definen los periodos entre los cuales un oscilador (edificio), experimenta una respuesta máxima
	T_B	periodo característico del espectro (en segundos)	$T_B = K \frac{C}{2,5}$	
	K	definido anteriormente		
	C	definido anteriormente		
v		Factor par la modificación del espectro de respuesta elástica en función del amortiguamiento	$v = (5/\Omega)^{0,4}$	
	Ω	amortiguamiento de la estructura expresado con porcentaje del crítico.		

Tabla 7. Recopilación de la información sísmica a recoger según la normativa de construcción sismorresistente general (NCSE-02).

El coeficiente de amplificación del terreno (C) se establece en base a la velocidad de propagación de las ondas S, y sus valores quedan recogidos en la tabla siguiente (Tabla 8):

TIPO DE TERRENO	EJEMPLOS	COEFICIENTE C	Vs
I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso.	1,0	>750 m/s
II	Roca muy fracturada y suelos densos o duros	1,3	400-750 m/s
III	Suelo granular de compactación media o cohesivo de consistencia firme a firme.	1,6	200-400 m/s
IV	Suelo granular suelto o cohesivo blando	2,0	<200 m/s

⁷ Para sismos pequeños, en general la aceleración es más alta en suelos blandos que en suelos duros.

Tabla 8. Recopilación de la información sísmica a recoger según la normativa de construcción sismorresistente general (NCSE-02).

Espectro de respuesta elástica

Generalmente expresados de manera gráfica, son herramientas que muestran la respuesta de un edificio o estructura ante la vibración del terreno en el que se emplaza. Pueden ser espectros de movimiento, de aceleración o de velocidad.

La Norma Sismorresistente española (NCSE-02) define un espectro normalizado de respuesta elástica en la superficie libre del terreno, para aceleraciones horizontales (las que mayor daño pueden causar a una estructura), que se corresponde con un oscilador lineal simple con un amortiguamiento de referencia del 5% respecto al crítico (M.Fomento, 2002).

Cuando un edificio vibra inicialmente por su base, toda su estructura comienza también a vibrar. Pero dado que no se trata de un elemento completamente rígido, la vibración no es igual en las distintas alturas o pisos que lo conforman, variando para cada una de ellas los periodos y las aceleraciones.

El espectro elástico de respuesta muestra la aceleración máxima absoluta de vibración de la estructura. Ésta depende de:

- la aceleración de la vibración a la que se somete la base.
- el periodo de oscilación de la estructura: si es muy corto, la estructura será rígida. En el caso contrario, periodos largos, la vibración del edificio es más lenta que la del suelo, de modo que la estructura se independiza y el espectro de respuesta es muy reducido. Los mayores valores del espectro elástico se dan para periodos de oscilación intermedios de 0,3-0,6 s.
- el tipo de suelo sobre el que esté vibrando la estructura.

Cálculo (Capítulo 3. NCSE-02)

El proceso de cálculo trata de verificar las condiciones de seguridad de las construcciones ante las acciones sísmicas. Para ello la norma explica cómo se determinan:

- masas del edificio
- periodos y modos de vibración de la estructura
- respuesta de la estructura ante las acciones sísmicas definidas según el Capítulo 2 de la norma.
- verificación de la seguridad de la estructura.

La construcción debe resistir la acción horizontal del sismo en todas las direcciones, lo que obliga a analizarlo en más de una dirección. En general, basta con considerar dos direcciones ortogonales en planta, en cuyo caso las sollicitaciones obtenidas en cada

dirección se combinarán con el 30 % de la otra. Las solicitaciones verticales y en planta se podrán considerar como cargas de carga independiente.

Métodos de cálculo

- análisis de la estructura mediante espectros de respuesta como método de referencia para el estudio sísmico
- estudio dinámico por integración de registros de aceleración.
- método simplificado:
 - Número de plantas inferior a veinte.
 - Altura sobre rasante del edificio inferior a sesenta metros.
 - regularidad geométrica en planta y en alzado, sin entrantes ni salientes importantes.
 - dispone de soportes continuos hasta cimentación, uniformemente distribuidos en planta y sin cambios bruscos en rigidez.
 - regularidad mecánica en la distribución de rigideces, resistencias, masas, de modo que los centros de gravedad y de torsión de todas las plantas estén situados, aproximadamente, en la misma vertical.
 - la excentricidad del centro de las masas que intervienen en el cálculo sísmico respecto al de torsión es inferior al 10% de la dimensión en planta del edificio en cada una de las direcciones principales.

El método simplificado

Se hace la asimilación de la estructura por un modelo unidimensional constituido por un oscilador múltiple con un sólo grado de libertad de desplazamiento por planta. Su análisis se realiza a partir de un sistema de fuerzas horizontales que resultan equivalentes a las de los terremotos.

1º. Modos de vibración (Capítulo 3.7.2)

Número de modos a considerar: una estructura puede vibrar teóricamente de diferentes formas. En realidad, los registros son una mezcla de todas ellas. La normativa contempla al menos tres modos de vibración (Figura 19), y para su definición o caracterización se puede recurrir a diversos métodos (ensayos, modelos, teoría o aproximaciones).

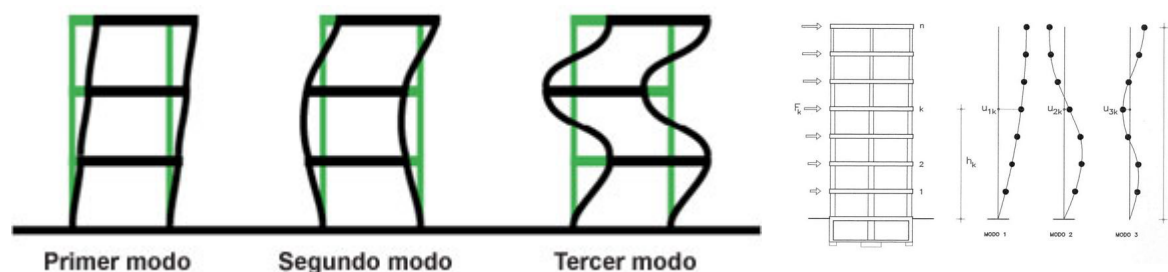


Figura 19. Tres modos de vibración para un edificio de tres plantas (tomada de <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=527>). Para saber más: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=527>. A la derecha, modos de vibración recogidos en la NCSE-02 para el método simplificado de cálculo.

El Método Simplificado propone:

- el primer modo, (T_1), si $T_F \leq 0,75$ s, siendo T_F el periodo fundamental de la construcción. Se define aproximadamente según H, L, B y n (alto, largo, ancho y plantas del edificio), y depende del tipo de estructura (Tabla 9).
- El primer y segundo modos (T_1 y T_2), si $0,75 \text{ s} \leq T_F < 1,25$ s.
- Los tres primeros modos (T_1 , T_2 y T_3), si $T_F > 1,25$ s.

$$T_i = \frac{T_F}{(2i-1)}$$

TIPOLOGÍA DE EDIFICIO	T_F periodo fundamental
Edificios con muros de fábrica de ladrillo o bloques	$T_F = 0,06H \sqrt{H/(2L+H)}/\sqrt{L}$
Edificios con pórticos de hormigón armado sin la colaboración de pantallas rigidizadoras	$T_F = 0,09n$
Edificios con pórticos de hormigón armado con la colaboración de pantallas rigidizadoras	$T_F = 0,07n \sqrt{H/(B+H)}$
Edificios de pórticos rígidos de acero laminado	$T_F = 0,11n$

Edificios de pórticos rígidos de acero laminado con planos triangulados resistentes	$T_F = 0,0085n\sqrt{H/(B+H)}$
---	-------------------------------

Tabla 9. Expresiones para el cálculo del período fundamental de un edificio mediante el método simplificado de cálculo. (H, metros): altura del edificio sobre rasante; (n): número de plantas sobre rasante; (B, metros) dimensión de las pantallas rigidizadoras, o de los planos triangulados, en el sentido de la oscilación; (L, metros), dimensión en planta de la edificación, en el sentido de la oscilación.

2º. Cálculo de las fuerzas sísmicas

Para cada planta, y para cada modo de vibración, hay que determinar la fuerza sísmica estática equivalente (F_{ik}), resultado de un producto entre una masa (las de cada planta, con cargas y sobrecargas) y una aceleración (la horizontal con modificaciones)(Tabla 10).

$$F_{ik} = s_{ik} \cdot P_k$$

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN DE CÁLCULO	OTROS
s_{ik}	coeficiente sísmico adimensional correspondiente a la planta k en el modo "i" de vibración.	$s_{ik} = (a_c/g) \cdot \alpha_i \cdot \beta \cdot \eta_{ik}$	
a_c	ver el apartado "Información Sísmica"		

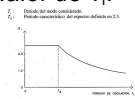
α_i	coeficiente	<p>Si $T_i \leq T_B$ $\alpha_i = 2,5$ Si $T_i > T_B$ $\alpha_i = 2,5 \cdot (T_B/T_i)$</p> <p>$T_B$ definido en el “Información Sísmica”.</p>	<p>depende del valor de T_i.</p> 
β	coeficiente de respuesta	<p>$\beta = v/\mu$</p> <p>v, factor de modificación del espectro, definido en “Información Sísmica”.</p> <p>μ según la ductilidad de la estructura.</p> <p>$\mu=1$, si no hay ductilidad. $\mu=2$, si la ductilidad es baja. $\mu=3$, si la ductilidad es alta. $\mu=4$, si la ductilidad es muy alta.</p>	<p>depende del amortiguamiento o y del coeficiente de comportamiento por ductilidad. Tabulada para las combinaciones más habituales.</p>
η_{ik}	factor de distribución correspondiente a la planta k, en el modo “i” de vibración	$\eta_{ik} = \Phi_{ik} \cdot \left(\sum_{k=1}^n m_k \cdot \Phi_{ik} \right) / \left(\sum_{k=1}^n m_k \cdot \Phi_{ik}^2 \right)$ <p>n: número de plantas m_k: masa de la planta k Φ_{ik}: coeficiente de forma de la planta k en el modo de vibración i.</p> $\Phi_{ik} = \text{sen} [(2i - 1)\pi \cdot / (2H)]$	

Tabla 10. Obtención de las fuerzas sísmicas según la normativa sismorresistente NCSE-02.

3º. Sistema de fuerza estáticas equivalentes

Se denominan F_k , y se obtienen a partir de las fuerzas sísmicas F_{ik} determinadas según se acaba de presentar.

Cortante de cada planta “k” en el modo “i”:

- suma de las F_{ik} existentes entre la última planta y la planta considerada.

Cortante combinado V_k de la planta k para los distintos modos “i”:

$$v_k = \sqrt{\sum_{i=1}^r v_{ik}^2}, \text{ siendo “r” el número de modos considerados}$$

Obtención del sistema de fuerza estáticas equivalentes F_k para cada planta k, por diferencia entre los valores del cortante V_k y del cortante de la planta superior V_{k+1} :

$$F_k = v_k - v_{k+1}$$

Estas fuerzas, una por cada planta, se repartirán entre cada uno de los elementos resistentes, de manera que se satisfaga el equilibrio en planta. La fuerza horizontal en el elemento “j” del nivel “k” tiene el valor:

$$f_{kj} = F_k \cdot \frac{K_{ji}}{\sum_{j=1}^n K_{ji}}$$

siendo “K” la rigidez de cada elemento resistente “j” en la dirección de la fuerza considerada.
8

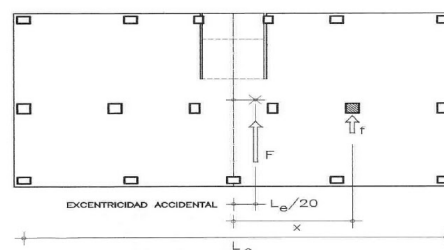
4º. Consideración de los efectos de rotación

Si el edificio cuenta con una distribución homogénea de muros o soportes y de masas, las solicitaciones debidas a la excentricidad adicional a la que se refiere el apartado 3.2 se podrán tener en cuenta multiplicando las fuerzas obtenidas en el apartado “Sistemas de fuerzas estáticas equivalentes” en cada uno de los elementos resistentes por un factor definido por:

$$\gamma_a = 1 + 0,6 \frac{x}{L_e}, \text{ siendo}$$

- (x) la distancia del elemento que se considera al centro del edificios, medida perpendicularmente a la dirección de la acción sísmica considerada.
- (Le) la distancia entre los dos elementos resistentes más extremos, medida de la misma forma.

Figura 20. Distancias a considerar para los efectos a rotación según el método simplificado de cálculo.



5º. Efectos de segundo orden

En un diseño ingenieril es de vital importancia que la frecuencia de vibración natural de un edificio se aleje de la vibración que pueda generar un seísmo; de este modo se evita la resonancia o amplificación del movimiento.

⁸ Para una lámina de madera:

https://es.wikipedia.org/wiki/Rigidez#Rigideces_en_placas_y_l.C3.A1minas

IV. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y construido una mesa vibradora que permite la simulación de eventos sísmicos, y sobre ella hemos modelizado perfiles de terrenos arenosos saturados, que convenientemente vibrados, se licúan y muestran un proceso de licuefacción.

Acompañando a la simulación del terreno y del evento sísmico, se han construido varias tipologías de estructuras de madera, muy sencillas, que permiten además colocar sobre ellas acelerómetros. Con éstos, los efectos de los eventos sísmicos se registran y se visualizan en tiempo directo en un ordenador portátil, o en diferido, tratando los datos registrado con una hoja de cálculo. Para esto último se ha empleado Arduino.

Se ha propuesto una actividad completa a realizar con la mesa vibradora y estructuras, que pueda servir de guía para fines docentes en áreas como la física, la geología, la mecánica de suelos, la ingeniería sísmica y la electrónica.

Lo anteriormente expuesto cubre en su totalidad los objetivos planteados en la solicitud de este proyecto. Sin embargo, durante su desarrollo, optamos por completar el modelo con otros cuatro adicionales - tres de ellos construidos expresamente para este proyecto- que servirán de introducción al más complejo de la mesa vibradora.

El conjunto de modelos y actividades propuestas constituyen un guión para desarrollar mediante charlas o incluso workshops ante audiencias de alumnos de Secundaria, Bachillerato y Universidad, contribuyendo de este modo a potenciar el interés por los estudios de carácter técnico de la Escuela de Zamora.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beer, F.; Johnston, R.; Cornwell, P.J. (2007). Mecánica vectorial para ingenieros. Dinámica. Editorial McGraw Hill. pp. 436.

Minke, G. (2005). Manual para construcción para viviendas antisísmicas de tierra. http://www.itacanet.org/esp/construccion/Construccion_tierra.pdf).

Moreno, C. (2014). Análisis de daños estructurales causados por sismos en escuelas de la República Dominicana. Tesis de Máster para el título de Máster Tecnología de la Arquitectura. Universidad Politécnica de Cataluña. UPC. <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24633/20141210%20TFM%20Carmen%20Moreno.pdf?sequence=1>

Shankar, R. (2015). How do earthquake resistant buildings work?. <https://www.quora.com/How-do-earthquake-resistant-buildings-work>

Tipler, P.A. (1993). Física. 3ª Edición. Volumen I. Editorial Reverté S.A. pp. 595.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los modelos creados no hubieran sido posibles sin la colaboración de José Ángel Alonso, Jesús de la Concepción y Juan José Morillo, personal de laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de Zamora. Sirvan estas líneas para expresar nuestro agradecimiento por su ayuda: sin ella este proyecto no hubiese podido llevarse a cabo.